

高纬度寒区变电站接地网设计优化研究

对高纬度寒区冻土进行电阻率实地测量,根据实验结果建立土壤模型,得到冻土接地网的接触电压等参数曲线,同时进行正常和冰冻时期的数据对比分析,将接地网传统等间距分布方案优化为指数型分布,并在接地网适当位置布置地棒。结果表明,分路电流由400 A变为350 A,分路电动势由4 000 V变为3 500 V,该优化措施应用在冰冻期的哈尔滨市冰冻期变电站土壤模型上,将接地网改变为稠密的指数型分布之后最大接触电压下降了56.24%;在接地网四个角添加导体棒后最大接触电压下降3.01%,并达到安全标准。实例中哈尔滨市变电站为三层土壤模型,均方根误差为15.82%,相对于二层的降低了约4.71%,更符合实际,大大降低了接触电压以及单端的分路电流,保障了接地网的安全运行。

黄一凡 周宏威 卢延飞 刘常义/东北林业大学机电工程学院

0 引言

我国东北部地区纬度高、气候寒冷,存在季节性冻土。随着我国大电网向超高压、大容量和远距离趋势发展以及大量电气设备的应用,需要将电力装置某些部分和大地相连,即接地。但是由于冻土层土壤电阻率随季节变化较大,给变电站的接地设计带来较大的困难。国内接地网的设计大多依靠设计手册上的经验公式和工作者的经验来完成,但是这些经验公式并不适用于我国高纬度寒区的接地网。首先,绝大多数公式考虑的是均匀土壤,而东北地区的地理位置复杂,含有冻土层等特征复杂的土壤结构,故土壤模型与实际情况相比存在较大误差;其次,一些实用公式的使用前提是地网结构为等间距分布,不适用于非等间距布置的地网情况;另外,设计手册的公式只能计算接地网参

数平均值,无法准确分析地表电位的分布特征。

为解决上述问题,文献[1]最早提出“不等间距”概念;文献[2]针对接地网水平导体优化布置进行了研究;文献[3]基于不等电位理论模型,讨论了均匀土壤的接地网优化,并采用数值计算法得到最佳压缩比求解公式;文献[4]从进化算法角度对接地导体不等间距分布进行了研究。但是上述研究的前提都是针对单层均匀的土壤模型,与实际应用结果出入较大。目前美国、加拿大等国家220 kV等级变电所都建在电阻率较低的地区,接地工程相对简单,而我国大连、哈尔滨等地区均位于高土壤电阻率地区,降低接地电阻难度较大,成本较高。因此,在此领域所作的针对性研究较少,有待进一步探讨。

针对上述问题,本文基于我国高纬度寒区变电站的土壤特点,采用仿真计算手段,从接地网导体布置稠密度和边界导体布置两个角度对接地网的优化开展研究;对目前广泛采用的单层均匀土壤模型进行改进,在实际算例中采用考虑冻土层的三层土壤模型进行分析。通过改变高纬度寒区冻土层接地网附近接地导体的布置形式,最大程度降低跨步电压和接触电压,以满足我国北部电力系统接地网设计运行的需要。

1 Wenner法测量土壤电阻率

变电站土壤电阻率的测定是接地工程测量的基础,直接影响接地系统的设计与优化,本文采用Wenner法测量土壤



黄一凡/助理工程师

关键词/Keywords

高纬度寒区·
冻土层·
接地网优化·
接触电压·
土壤电阻率·

电阻率,在此基础上完成接地网相关参数(如分路电流、分路电动势等)的仿真、优化和讨论分析。土壤电阻率测量的基本原理是:从两个对外裸露的电极上注入电流,测量两个电位探针之间的电压大小。Wenner法是目前应用最广泛的电阻率测量方法。

2 基于土壤电阻率的土壤建模

在利用接地分析软件CDEGS进行土壤模型构建前,以最小二乘法为基础建立由实际值和模型计算值组成的目标函数。基于实测所得各层土壤的电阻率、土壤厚度、土壤层数和土壤表面实际视在电阻率大小,利用无约束非线性最优化的方法对目标函数进行最优化选择,反演得到土壤结构模型。基于CDEGS软件计算得到二层土壤电阻率模型如表1所示(假设编号1表示空气层,编号2、3分别表示土壤的两层属性)。同理,计算得到五层土壤电阻率模型如表2所示。二层土壤与五层土壤模型的对数图像如图1所示。

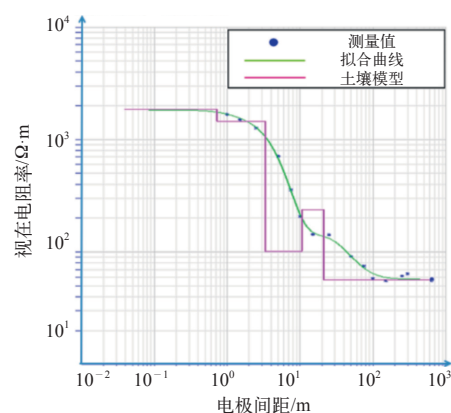
表1 二层土壤模型计算数据

层号	电阻率/ $\Omega \cdot m$	厚度 (feet)	反射系数
1	0.1000000E+21	100 000.0	0.000 0
2	456.732 4	3.624 309	1.000 0
3	20.735 97	0.1000000E+11	-0.913 14

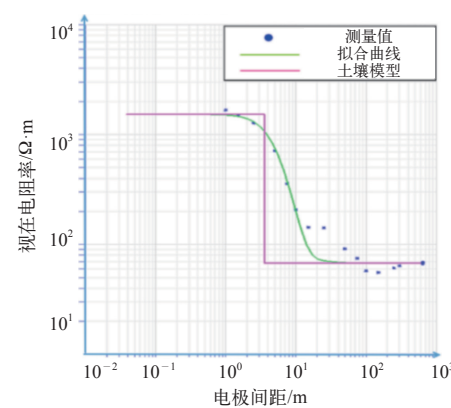
表2 五层土壤模型计算结果

层编号	电阻率/ $\Omega \cdot m$	厚度 (feet)	反射系数
1	0.1000000E+21	0.1000000E+17	0.0
2	501.934 9	2.909 270	-1.000
3	40.774 49	3.095 061	-0.849 74
4	39.571 01	0.651 471 6	-0.149E-01
5	44.760 67	21.503 83	-0.615E-01
6	17.369 23	0.1000000E+21	-0.440 87

由表1和表2可知,二层土壤模型中第1层土壤电阻率可达456.732 4 $\Omega \cdot m$,远大于第2层的20.735 9 $\Omega \cdot m$;五层土壤模型中第1层土壤电阻率为501.934 9 $\Omega \cdot m$,远大于第2层的40.774 5 $\Omega \cdot m$,体现出高纬度寒区冻土层电阻率较高的特点。土壤层数为二层和五层时均方根误差分别为20.059 2%和6.519 58%,说明五层土壤模型拟合程度更好,与实际土壤结构更接近。根据文献[4],在实际工



(a) 二层土壤模型



(b) 五层土壤模型

图1 二层土壤与五层土壤模型的对数图像对比

程中可用等效二层大地土壤模型代替实际大地结构,以满足计算接地电阻、跨步电压和接触电压的要求,但考虑冻土层的特殊性,本文为体现冻土层而将其单独作为一层建模,故采用三层土壤模型。

3 寒区冻土层接地网布置

在高纬度寒区的变电站冬季会出现季节性冻土层,其电阻率大,导致接地电流泄放速度较慢。一般温度在0 $^{\circ}C$ 以上时,土壤电阻率基本不变;但是在0 $^{\circ}C$ 以下时,随着温度降低,含有水分的土层由于水分冻结导电性显著降低,电阻率将显著增大。对于岩土层,当温度达到-20 $^{\circ}C$ 时,土壤的电阻率可以高达 $10^6 \Omega \cdot m$ 。

因为高纬度寒区的土壤电阻率升高的是表层,而不是所有的地下土壤的电阻率都受影响。当接地系统埋设于冻土层范围内时,随着冬季温度降低到0 $^{\circ}C$ 以下,冻土层的电阻率增加,接地电

阻随之增加,可能导致接触电压、跨步电压等相关参数超过安全指标,危及人身和设备安全,具体影响定量如表3所示。

表3 冻土层对水平地网电气参数的影响

埋深	季节	最大接触电压/V	最大阻抗/ Ω	跨步电压/V
0.5	冰冻	3 461	0.397	540
	正常	504	0.087	65.3
	增加倍数	6.867	4.563	8.269
1.0	冰冻	3 417	0.425	517
	正常	484	0.092	58.1
	增加倍数	7.059	4.619	8.898
1.5	冰冻	418	0.094	45.7
	正常	374	0.086	44.1
	增加倍数	1.117	1.093	1.036

根据表3可知,有季节性冻土时接地电阻比正常气候下增大约4倍,接触电压增大约7倍,跨步电压增加约8倍。因此,高纬度较寒冷地区接地系统可能在春季满足要求,而冬季却超过安全指标。通过纵向比较埋设深度,即在0.5~1.5 m范围内可以看出冻土层受接地网的重要参数影响很大,针对高纬度寒区存在冻土的接地网,在设计时应认真考虑冻土层厚度,将接地网埋设在冻土层以下,最大程度减少冻土层对接地网的影响。

4 冰冻季节接地网优化

4.1 实例分析

哈尔滨市某110 kV变电站即将投运,冰冻期最低温度可达 -31°C 。为了与3个终端实现安全互联,防止故障电流造成设备、人员伤害,需对其接地网进行优化设计。应说明,本文优化环节将认定跨步电压已经在安全范围内,在此前提下进行优化与工程仿真实践。

本文着重说明优化过程,结果如表4所示,确定土壤模型(考虑探针深度),层数 N 设为3层。在CDEGS软件环境下的计算结果如图2所示。

4.2 不等间距接地网布置

对于不等间距接地网,文献[5]研究了两层土壤中接地网的优化设计;文献[6]以使接触电压达到最小值为目标函数进行计算,通过最小二乘法

表4 实例土壤模型(融冻、冰冻)

层数编号	参数	融冻时期	冰冻时期
1 (空气层)	参数	$0.1\text{E}+21$	$0.4\text{E}+21$
	厚度 (feet)	100 000	100 000
2	电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	152.8	4 700
	厚度 (feet)	24.5	24.5
3	电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	115.4	115.4
	厚度 (feet)	145	145
4	电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	18.6	18.6
	厚度 (feet)	$0.1\text{E}+21$	$0.1\text{E}+21$

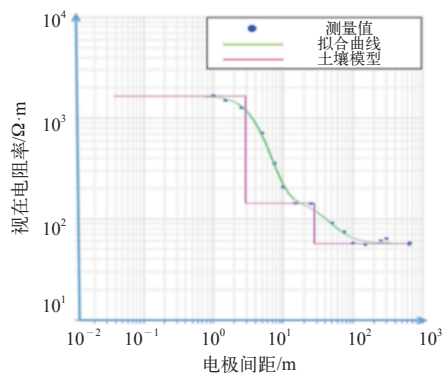
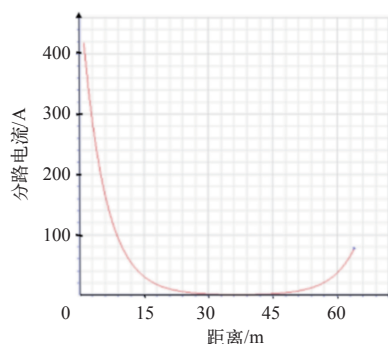


图2 冰冻期变电站土壤模型

对接地参数进行拟合,得到最佳压缩比的求解公式,然而由于是一般性规律,对具体实例仍存在误差。CDEGS推荐采用指数布置规律对土壤稠密度进行优化修正,将中心网孔加大,边缘网孔减小,用以减小边角网孔与中心网孔电动势的差值,若差值为0,则所有导体都得到了最充分的利用。冰冻季节对接地网先增加一定数量导体使其压缩比由1变为0.8,以此增大导体分布密度。

图3为未优化冻土季节单终端时杆塔分路结构流过的电流与电动势(以下简称分路电流与分路电动势)分布。在故障点附近大部分电流通过周



(a) 分路电流

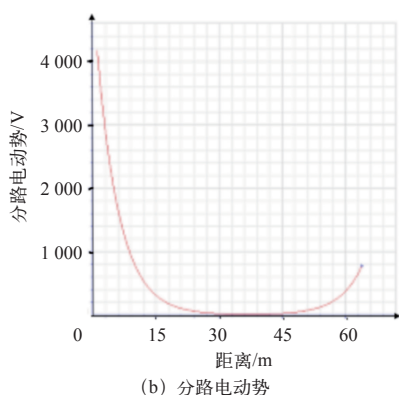


图3 初始分路电流和电动势分布

围的杆塔流入大地，随着距离扩散，电流和电动势下降较快；接近终端时，二者又出现回升，并呈现非均匀性，部分原因是变电站的入地电流畸变附近杆塔的感应电位所致。

图4显示出跨步电压分布不对称，其部分是由土壤电阻率不均所致。对比优化前后的接触电压如表5所示，可知最大、最小接触电压分别下降了56.239%、64.772%。

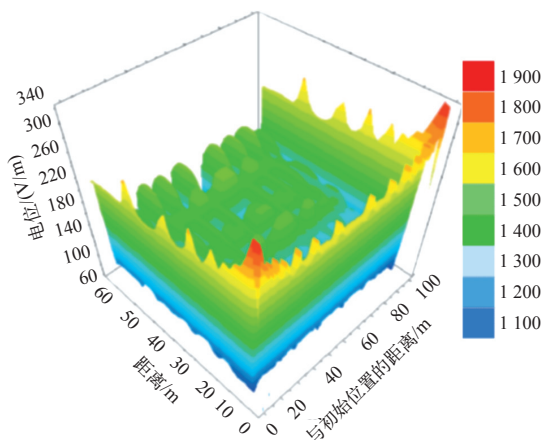


图4 优化冻土时接地网跨步电压俯视图

表5 接触电压极值对比

(单位: V)

	最大接触电压	最小接触电压
初始	2 280.106	933.100
优化	997.800	328.711

初始、优化接地网接触电压分布如图5所示。

由于均压带在地网中均匀布置，最大接触电压分布在接地网四角，边角接触电压比次边角网孔高20%~30%，整个图像接触电压都超过表6所要求的安全范围，有从四周向中心电压下降的总

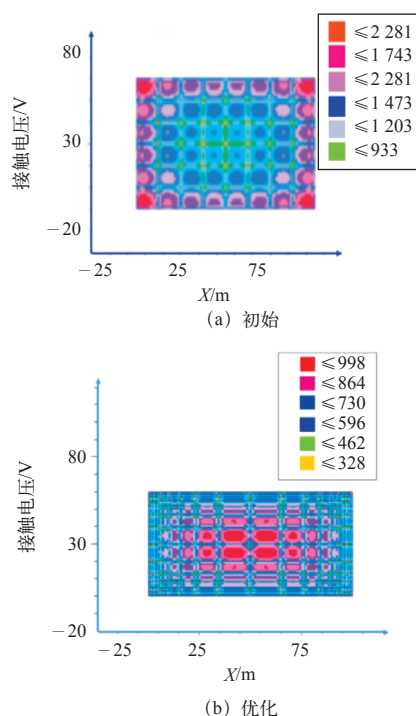


图5 初始、优化接地网接触电压分布

体趋势。增大冰冻季节接地网导体数目以及接地网边缘导体稠密度后，接地网四角接触电压远高于安全值的问题大大改善，优化后不安全电压主要集中于接地网中心，极大改善了安全裕度。优化后的分路电流与分路电动势分布如图6所示，发现曲线的分布趋势不变，优化后分路电流和分路电动势有所下降，分路电流由400 A变为350 A左右，分路电动势由4 000 V变为3 500 V左右，下降约12.5%，说明这对于电网安全投运是很好的措施。

表6 定义安全阈值

(单位: V)

接触电压的安全阈值	956.8
跨步电压的安全阈值	3 241.3

4.3 增设接地棒

为了使整个接地网的接触电压处于安全范围，在冰冻季节地网四角创建导体棒，短路电流能够得到有效释放，由图7与图5对比可见接触电压全部安全，最大值分布在接地网中心，为905.010 V，均压效果较理想，冰冻时期的接地网接触电压下降约30%。至此，冰冻期变电站接地网优化完毕。

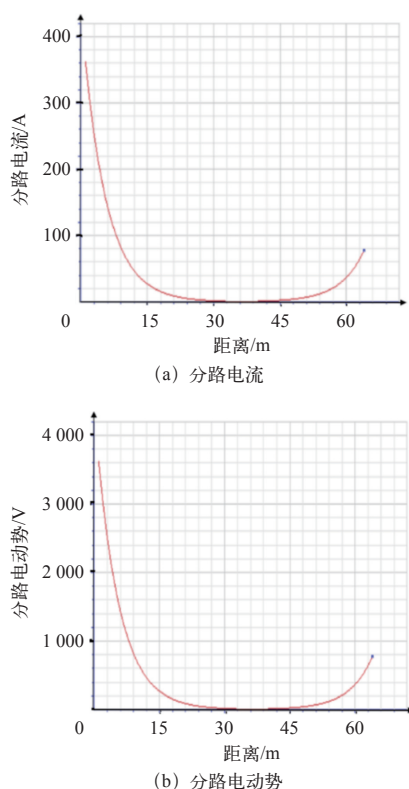


图6 优化后分路电流、分路电动势分布

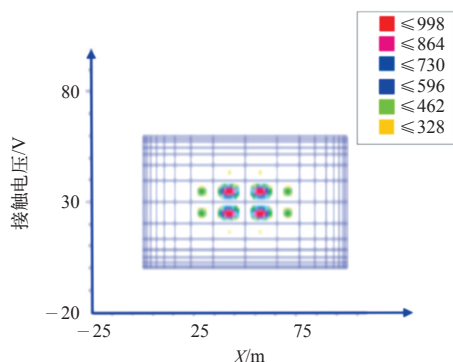


图7 优化后不安全接触电压分布

5 结束语

首先通过测得高纬度寒冷地区冻土层电阻率得到含冻土层的三层土壤分布模型。在对比前人方法基础上,提出按指数规律布置和创建接地棒的接地网优化方法,随着压缩程度的增加,接触电压存在最小值,利用CDEGS软件中的Auto Grid Pro模块,对冰冻期哈尔滨市中心站与终端的接地网接触电压等进行仿真计算,在改变为稠密的指数型接地网后最大接触电压下降了56.24%;接地网四角分别增设导体棒后,最大接触电压下降

了30.1%,同时提高了接地网安全裕度。

其次,哈尔滨市变电站三层土壤模型均方根误差为15.82%,相对于二层的降低了约4.71%。这样不仅规范电气设备的投放使用,还能降低所占用的土壤空间规模,节约成本。为了降低高纬度寒区冻土层对接地系统的影响,变电所的水平接地网应埋设在冻土层之下。由于寒区土壤模型为三层,上层的电阻率较大,下层电阻率小,推荐用穿透高阻层的垂直接地极降低接地电阻。

最后关于误差问题,分析认为首先受变电站和终端的接地阻抗值的影响,改变压缩比可降低接地电阻,但接地电阻主要由接地网的分布面积决定;另外是背景噪声,由于采集数据时附近可能存在谐波,将噪声和测量信号混淆,导致测量仪表读数摇摆不定,与真实值差别较大;地下腐蚀管道也会存在影响,金属裸露在管道表面产生极化电位以及泄漏电流,使得测得的数值失真。

参考文献

- [1] Sverak J G. Optimized grounding grid design of using variable spacing techniques [J]. IEEE T-PAS, 1976, 95 (1): 362-374
- [2] 常湧,王明磊,许崇武,等. 接地网网内电位差的均衡优化 [J]. 电网技术, 2008 (22): 98-102.
- [3] 荆晶,彭敏放,周斌,等. 基于扩展卡尔曼滤波算法的接地电阻状态可靠估计 [J]. 高压电器, 2018 (2): 166-172, 179.
- [4] Dawalibe F, Mukhedkar D. Transferred earth potentials in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1978, 97 (1): 90-101.
- [5] 高延庆,何金良,曾嵘,等. 非均匀土壤中变电站接地网优化设计 [J]. 清华大学学报, 2002, 42 (3): 345-348.
- [6] 曾南超. 高压直流输电在我国电网发展中的作用 [J]. 高电压技术, 2004 (11): 11-12.

(收稿日期: 2018-03-29) **EA**